干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

近20 a新疆天然草地NPP时空分析

陈春波[1,2]， 李刚勇[2]， 彭 建[2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 新疆维吾尔自治区草原总站干旱区草地生态系统遥感监测实验室，新疆 乌鲁木齐 830049）

摘 要：基于MOD17A3HGF NPP（Net primary productivity）与气温、降水量等数据，采用趋势分析与偏相关分析，在多个尺度（全疆、北疆与南疆、各地州市与11种草地类型）探讨了2000—2018年新疆天然草地NPP时空动态及其对气候变化的响应。结果表明：近20 a新疆草地NPP呈波动递增，多年均值为0.103 kg C·m^{-2}，由准噶尔西部山地、伊犁河谷、天山、阿尔泰山向准噶尔盆地、塔里木盆地逐渐降低；北疆草地多年平均NPP（0.149 kg C·m^{-2}）高于南疆（0.055 kg C·m^{-2}），北疆、南疆草地NPP均表现为增加趋势；各地、州、市草地NPP总体为增加，但年际变化分异明显；11种天然草地类型（除高寒荒漠类）NPP表现为递增趋势，但不同草地类型存在差异。2000年后，新疆气候暖湿化有利于草地植被生长，但降水年际变化增强导致草地NPP年际波动剧烈。研究结果为新疆天然草地碳收支评估提供基础数据，能够促进天然草地健康评价以及可持续利用。

关 键 词：非对称暖湿化；NPP；时空动态；空间对地观测；新疆天然草地

文章编号：

草地是地表分布最为广泛的生态系统类型，在全球碳循环与气候变化中扮演着重要角色[1]，具有防风固沙、维持水土、涵养水源与生物多样性保护等多种功能[2]。健康、稳定的草地生态系统具有可持续性，能够维持自我运作能力[3]，可以为人类的生存与发展提供持续、良好的生态服务[4-5]。净初级生产力（Net primary production, NPP）作为草地健康的关键变量，不仅表征草本植物活动的重要变量，而且是判定草地生态系统碳汇和调节生态过程的主要因子[6]。草地NPP为草地植被净的碳获取，是草地总初级生产中所获得的碳与植物线粒体呼吸所释放的碳之间的平衡[7]；草地NPP变化揭示了草地的时空演变格局，可以作为评价草地生态系统结构与功能特征的重要指标。

气候变化与不合理的开垦利用，导致新疆天然草地出现了不同程度的逆向演替[8-10]。近年来，以NPP为指示器国内学者做了大量工作推动了新疆草地研究，主要表现在以下3个方面：（1）草地NPP观测尺度由样地样方田间观测[9,11-12]逐步扩展到遥感空间对地观测，如MODIS数据集[13-15]、NOAA-AVHRR及其衍生的数据集（GIMMS3g-NDVI）[2,16]与国产高分遥感数据集[17]；由于样方采样数据无法描述草地NPP在区域尺度的时空动态，因此遥感观测逐渐成为一种被广泛接受的研究手段；低空无人机遥感具有分辨率高、时效性强尤其擅长云下飞行，正在草地研究中逐步推广[18-20]，如孙世泽等[21]采用无人机多光谱影像开展了新疆天然草地生物量估算，精度达到75%。（2）草地NPP研究方法多元化，包括统计学方法、遥感反演[22]与生态模拟，如CASA模型[23-26]、CENTURY模型[27]与Biome-BGC模型[28-29]；张仁平等[23]采用CASA模型分析了2001—2014年新疆草地NPP空间分布对气候变化的响应，遥感模型用于反演草

收稿日期：2021-07-02； **修订日期**：2021-09-29

基金项目：2020年自治区创新环境（人才、基地）建设专项（天山青年计划）（2020Q084）；2020年自治区创新环境（人才、基地）建设专项—自然科学计划（自然科学基金）青年科学基金项目（2020D01B57）；中国科学院西部青年学者B类（2018-XBQNXZ-B-011）；新疆维吾尔自治区草原总站外协项目；新疆维吾尔自治区草原总站外协项目资助

作者简介：陈春波（1985-），男，助理研究员，主要从事草地生态遥感研究. E-mail: ccb_8586@ms.xjb.ac.cn

通讯作者：彭建（1978-），男，正高级畜牧师，主要从事草地生态监测与评价研究. E-mail: pengjian1213@163.com

地NPP,但在点上的验证还较为匮乏;生态模型可模拟草地生态系统结构、功能以及碳水循环的复杂相互作用,能够预测未来时段草地的时空特征。(3)新疆气候变化与人类活动对草地NPP的影响研究[2,23,30-32];如陈宸等[8]采用多源数据分析了近20 a新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应,但没有阐述其余草地类型;赵鹏等[2]利用实际NPP与潜在NPP定量分析了气候变化和人类活动对新疆草地的影响。随着研究的不断深入,草地NPP已成为气候变化背景下的研究热点,草地NPP作为生态系统碳循环的重要组成,不仅反映了草地植被的生产能力,在碳源、碳汇的转换中尤其重要,我国要在预定时期内实现碳达峰、碳中和,草地NPP有着重要意义。

本研究以遥感和地理信息系统为基础,采用MODIS NPP数据集、气候再分析数据及其相关辅助数据,探讨2000—2018年新疆天然草地NPP时空变化。为客观、精确地刻画出天然草地NPP时空特征,在全疆、北疆与南疆、各地州市及其11种草地类型中分别开展草地NPP年际变化分析。采用偏相关方法进一步分析气温、降水与天然草地NPP的相关关系,揭示近年来气候变化对天然草地NPP的影响。天然草地时空分析既是草地生态结构、功能研究的重要内容,也是草地可持续利用的基础,能够促进新疆天然草地保护及其草地资源合理使用,有利于新疆经济社会发展。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区(简称新疆,34°22′~49°33′N、73°32′~96°21′E)位于我国西北部,地处亚欧大陆中心,面积为166×10⁴ km²,占全国陆地面积的1/6(图1)。新疆为典型的干旱区,属于温带大陆性气候,年平均气温9~12 ℃,降水少,蒸发强,气候干燥,多年平均降水量150 mm。新疆地理环境特征为“三山夹两盆”,由北向南分别为阿尔泰山、准噶尔盆地、天山、塔里木盆地与昆仑山,海拔最低为-155 m(吐鲁番艾丁湖),最高为8611 m(乔戈里峰),根据新疆地理要素及其气候特征[33],将新疆分为北疆和南疆①②。远离海洋、高山环抱与封闭的大小盆地造就了新疆特殊的自然地理环境,导致水热空间分布差异显著[34],发育了丰富多样的天然草地。新疆天然草地面积5725.88×10⁴ hm²,全国五大牧区之一[35],共计11个大类,25个亚类,131个草地组,687个草地型,其中大类包括:高寒荒漠类、高寒草原类、高寒草甸类、山地草甸类、温性草甸草原类、温性草原类、温性荒漠草原类、温性草原化荒漠类、温性荒漠类、低地草甸类与沼泽类[36]。新疆天然草地分布于阿尔泰山、准噶尔西部山地及盆地、天山、昆仑山、塔里木盆地与昆仑山六大地貌单元。

1.2 数据来源与预处理

本文的源数据包括NPP、新疆天然草地分类与新疆行政区划。NPP为2000—2018年的MOD17A3HGFv006 [37](https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgfv006/),该数据为年尺度NPP,空间分辨率500 m。新疆天然草地分类来自新疆维吾尔自治区草原总站。

气候数据来自国家青藏高原科学数据中心-中国区域地面气象要素驱动数据集(China meteorological forcing dataset, CMFD)(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49/?q=China% 20meteorological% 20forcing% 20dataset)。该数据集以国际主流的Princeton、GLDAS、GEWEX-SRB与TRMM作为数据基础,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成,其精度介于气象局观测数据和卫星遥感数据之间,优于国际上已有的再分析数据[38-39]。本研究主要包括CMFD的气温与降水量。

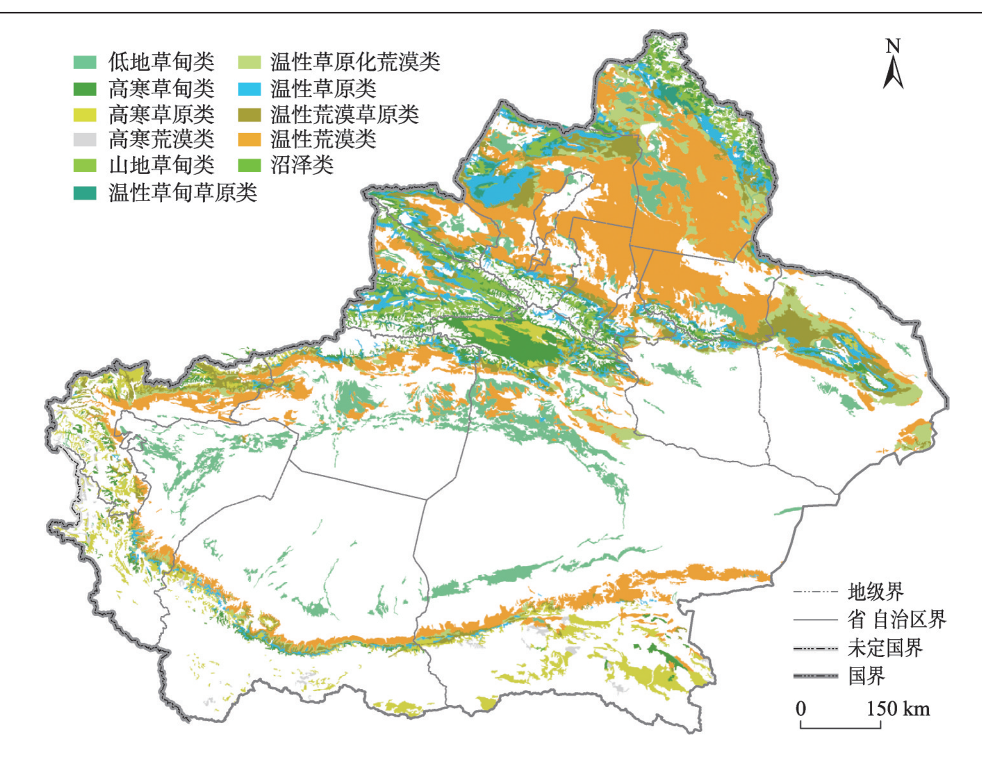
基于MOD17A3HGF数据,开展格式转化(即*.hdf转*.tif格式)、影像镶嵌、投影转换与裁剪,生成2000—2018年新疆天然草地NPP数据。新疆维吾尔自治区标准地图为*.jpg格式,在ArcGIS 10.2软件中完成地(州、市)级与全疆范围的数据库文件。CMFD气候数据的预处理:包括降水速率转化为年降水,将3 h气温转化为年均气温。

1.3 研究方法

1.3.1 新疆天然草地NPP统计方法 采用新疆天然草地NPP数据,分别在地(州、市)边界内、南北疆范

① 新疆维吾尔自治区人民政府网\畅游天山\自然地理\地形地貌:http://www.xinjiang.gov.cn/xinjiang/dmxj/dmxj.shtml。

② 新疆维吾尔自治区南、北疆范围:北疆包括乌鲁木齐市、五家渠市、石河子市、克拉玛依市、北屯市、双河市、昌吉回族自治州、博尔塔拉蒙古自治州、伊犁哈萨克自治州及其管辖的阿勒泰地区、塔城地区与伊犁州直属县(市);南疆包括阿克苏地区、喀什地区、和田地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州、巴音郭楞蒙古自治州、吐鲁番市、哈密市、阿拉尔市、图木舒克市、铁门关市、昆玉市。



注：该图基于新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图服务网站下载的审图号为新S(2020)026号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the research area

围与全疆尺度上统计并输出逐年草地NPP平均值、最大值、最小值与标准差（空间异质性）。利用2000—2018年的NPP数据，计算新疆天然草地NPP的多年平均空间格局。以新疆天然草地分类为基础，分别裁剪2000—2018年的天然草地NPP数据，经计算后输出相应的统计数值。在以上空间数据裁剪、统计与数值输出的过程中，均采用地理空间数据抽象库（Geospatial data abstraction library，GDAL）与Python编程语言实现。

1.3.2　新疆天然草地NPP年际变化　新疆天然草地NPP的年际变化率表征了草地NPP的年际变化，研究中采用线性趋势线（最小二乘法）来模拟天然草地NPP的年际变化[2]，计算公式如下：

$$k=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times \mathrm{NPP}_i)-(\sum_{i=1}^{n}i)\times(\sum_{i=1}^{n}\mathrm{NPP}_i)}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{1}$$

式中：n为研究时段的长度，本研究中n=19（即2018－2000＋1）；i为研究年份序号（即2000年定义为1，2001年定义为2，…，2018年为19）；NPP_i为研究时段i年天然草地NPP取值；k为新疆天然草地NPP的年际变化率，当k>0，即随时间变化天然草地NPP表现为增加趋势，当k<0，即天然草地NPP为减少的趋势。

1.3.3　新疆天然草地NPP与气温、降水量的相关性　为定量天然草地NPP与气候因子的相关性，研究中主要考虑气温、降水量对天然草地NPP的影响，在像元尺度上计算NPP与气温、降水量的偏相关系数[8]，计算公式如下：

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{2}$$

式中：r_{xy}为参数x、y之间的相关系数；x_i为第i年的草地NPP；y_i为第i年的气温或者降水量；$\bar{x}$为研究时段草地NPP均值；$\bar{y}$为研究时段气温或降水量的均值。

本研究的技术流程详细如图2。

2　结果与分析

2.1　新疆天然草地NPP时空特征

2.1.1　新疆天然草地NPP年际变化　2000—2018年新疆天然草地NPP均值为0.103 kg C·m^{-2}，总体为

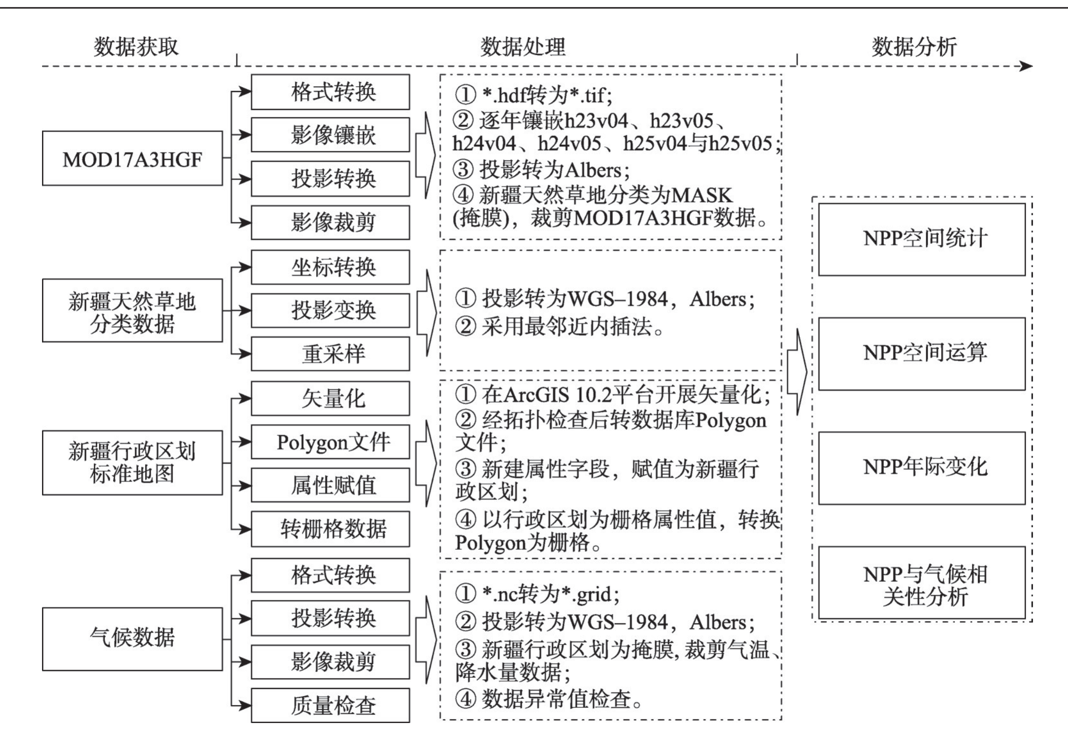


图2　数据处理与研究方法示意图

Fig. 2　Schematic diagram of data processing and research method

增加趋势(图3a、3d)。2000年NPP为0.091 kg C·m^{-2}，2018年为0.108 kg C·m^{-2}，从2000—2018年增加了0.017 kg C·m^{-2}。2000—2004年年均NPP为0.098 kg C·m^{-2}。同2000—2004年相比，2005—2009年、2010—2014年与2015—2018年年均NPP分别为0.099 kg C·m^{-2}(+1.0%)、0.110 kg C·m^{-2}(+12.2%)与0.111 kg C·m^{-2}(+13.3%)。研究时段内，NPP具有年际波动，2007年后呈扩大趋势(图3a~b)，NPP最小值为0.090 kg C·m^{-2}(2008年)，最大值为0.122 kg C·m^{-2}(2016年)。在2000—2004年NPP变化为0.013 kg C·m^{-2}，2005—2009年、2010—2014年与2015—2018年变化分别为0.014 kg C·m^{-2}(+7.7%)、0.021 kg C·m^{-2}(+61.5%)、0.022 kg C·m^{-2}(+69.2%)。

将NPP分别与前一年比较(同比)，显示NPP年际波动增强(图3c)。2000—2003年NPP增量0.013 kg C·m^{-2}(14.3%)；2004—2009年NPP正负增长交替发生，2008、2009年NPP增量首次出现最低值(−0.014 kg C·m^{-2})与最高值(0.012 kg C·m^{-2})；研究时段内，NPP增量的最低值与最高值分别为0.022 kg C·m^{-2}(2014年)与0.022 kg C·m^{-2}(2016年)。将NPP分别与2000年相比，显示NPP总体为增加；然而，最近3 a(2016—2018年)，NPP表现为递减(图3d)。2008年的天然草地NPP增量最小−0.001 kg C·m^{-2}(−1.1%)，2016年增量为最大0.031 kg C·m^{-2}(+34.1%)。同2016年比较，2018年天然草地NPP减少了0.014 kg C·m^{-2}(+11.5%)。

2.1.2　新疆天然草地NPP空间分布格局　在2000—2018年，新疆天然草地NPP(多年均值)具有空间分布差异(图4)，并且NPP年际变化具有空间分异(图5)。NPP由伊犁河谷、天山、阿尔泰山与昆仑山脉及其塔城地区向准噶尔盆地、塔里木盆地逐渐降低。NPP高值(>0.50 kg C·m^{-2})区域分布在伊犁河谷、天山与阿尔泰山，低值(<0.05 kg C·m^{-2})区域在准噶尔盆地腹地与塔里木盆地边缘(图4)。NPP(>0.2 kg C·m^{-2})仅占全疆天然草地总面积的19.5%，比重较小，但位置相对集中(伊犁河谷、阿尔泰山与天山山脉)(图4)。NPP(<0.05 kg C·m^{-2})占全疆天然草地总面积的45.6%，分布在准噶尔盆地腹地与东天山北坡以及塔里木盆地边缘(图4)。80.5%的区域草地NPP小于0.2 kg C·m^{-2}，尤其63.1%的区域小于0.1 kg C·m^{-2}。然而，天然草地NPP(>0.40 kg C·m^{-2})仅占全疆天然草地总面积的4.4%，特别是天然草地NPP(>0.50 kg C·m^{-2})的面积占比仅为1.4%，集中分布在伊犁河谷。

2.2　新疆南、北疆与各地、州、市天然草地NPP变化趋势

2.2.1　新疆北疆、南疆天然草地NPP变化　2000—2018年，北疆与南疆天然草地NPP均为波动增加趋

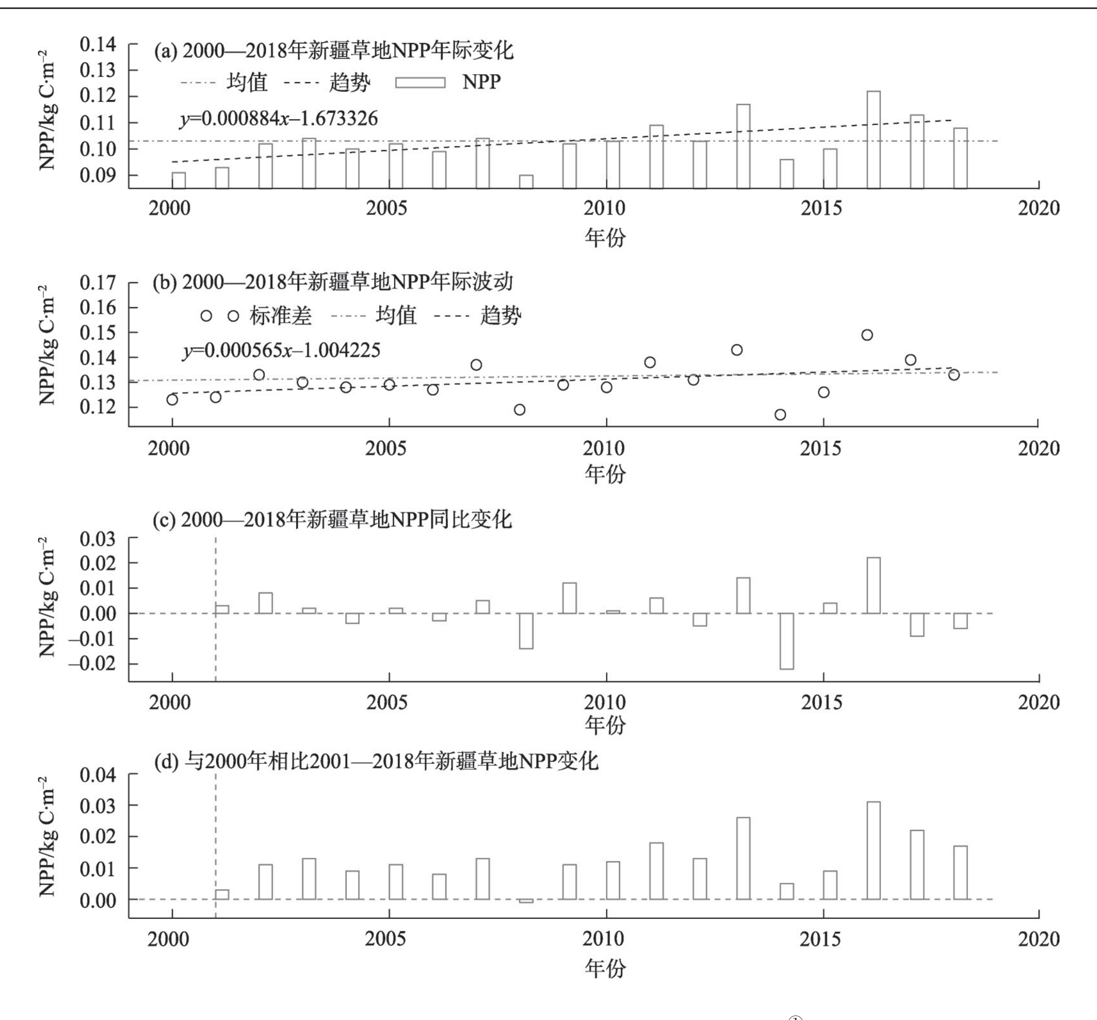


图3　2000—2018年新疆天然草地NPP时间变化①

Fig. 3　Interannual changes of natural grassland NPP in Xinjiang from 2000 to 2018

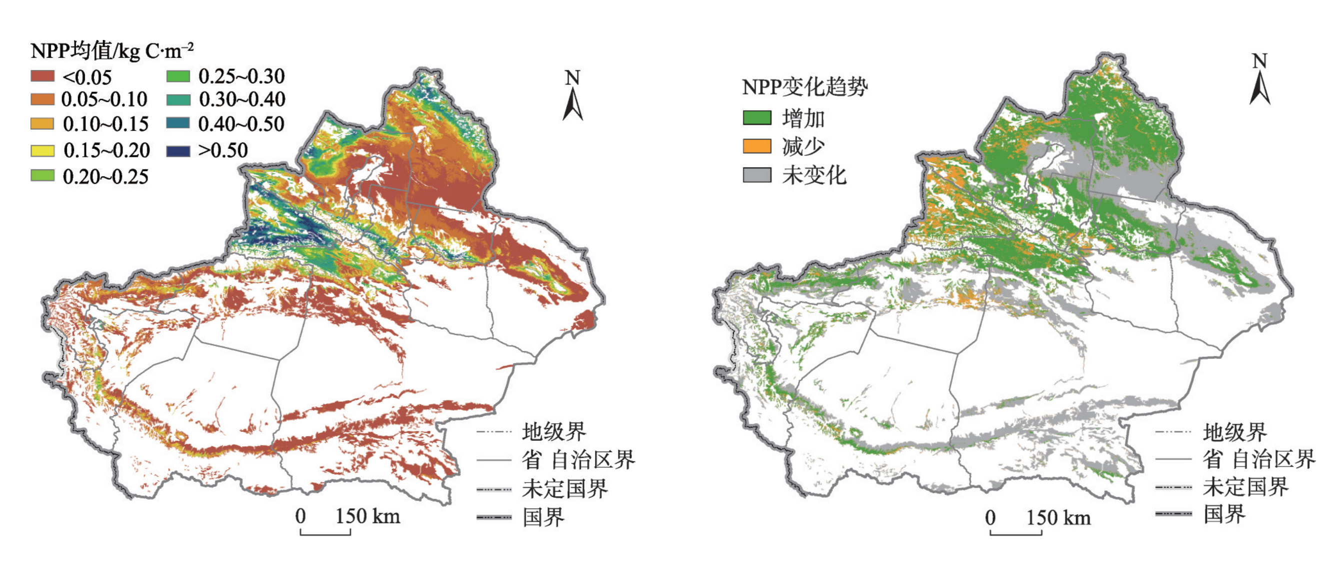


图4　2000—2018年新疆天然草地NPP均值空间分布特征

Fig. 4　Spatial characteristics of mean average natural grassland NPP in Xinjiang from 2000 to 2018

图5　2000—2018年新疆天然草地NPP年际变化空间格局

Fig. 5　Spatial pattern of interannual changes of natural grassland NPP in Xinjiang from 2000 to 2018

① (a)草地NPP为每年全疆尺度的草地NPP均值;(b)草地NPP年际波动为统计的全疆草地NPP的标准差;(c)当年草地NPP依次与前一年草地NPP的比较(同比);(d)基于2000年草地NPP,2001—2018年草地NPP分别与2000年草地NPP的比较。

势，北疆草地NPP多年均值（0.149 kg C·m^{-2}）高于南疆草地（0.055 kg C·m^{-2}）（图6）。2006年后北疆草地NPP年际变化扩大，2013—2016年草地NPP发生剧烈振荡，变化幅度为0.036 kg C·m^{-2}（2013—2014年）、0.039 kg C·m^{-2}（2015—2016年）。北疆NPP最低值与最高值分别为0.126 kg C·m^{-2}（2008年）、0.182 kg C·m^{-2}（2016年），而南疆为0.048 kg C·m^{-2}（2001年）、0.062 kg C·m^{-2}（2017年），北疆与南疆草地NPP最低值发生的时间不同。整个研究时段内，北疆草地NPP（多年平均）是南疆的2.7倍。

2.2.2 新疆各地、州、市天然草地NPP变化 2000—2018年全疆各地（区）、（自治）州、市（简称"地州"）草地NPP总体为波动递增，但NPP年际变化分异明显（图7）。北疆各地州草地NPP高于南疆各地州，而且北疆各地州（除克拉玛依市外）NPP均高于0.05 kg C·m^{-2}；南疆各地州草地NPP普遍低于0.10 kg C·m^{-2}，尤其和田地区NPP最低（0.037 kg C·m^{-2}）（图7）。伊犁州直属县（市）草地NPP（多年平均）高于0.30 kg C·m^{-2}，尽管NPP为增加趋势，但自2006年开始有2次（2006—2009年与2013—2016年）较大的脉动。北疆伊犁直属县（市）草地NPP（多年平均）最高（0.365 kg C·m^{-2}），其次为博尔塔拉蒙古自治州（0.166 kg C·m^{-2}）、乌鲁木齐市（0.139 kg C·m^{-2}）与塔城地区（0.129 kg C·m^{-2}）。南疆各地州草地NPP位于0.03~0.09 kg C·m^{-2}间，吐鲁番市NPP高于南疆其他各地州，和田地区与哈密市的草地NPP偏低。

2.3 新疆天然草地类型NPP年际变化

本研究分别对草地类型像元数值逐年计算平均值，得到草地NPP平均值的年际变化趋势（图8）。2000—2018年11种草地NPP表现为波动增加，但年际变化依然为增强的态势。整个研究时段，温性草甸草原类的变化幅度为0.090 kg C·m^{-2}（图8f），其次为山地草甸类（0.082 kg C·m^{-2}）（图8e）与温性

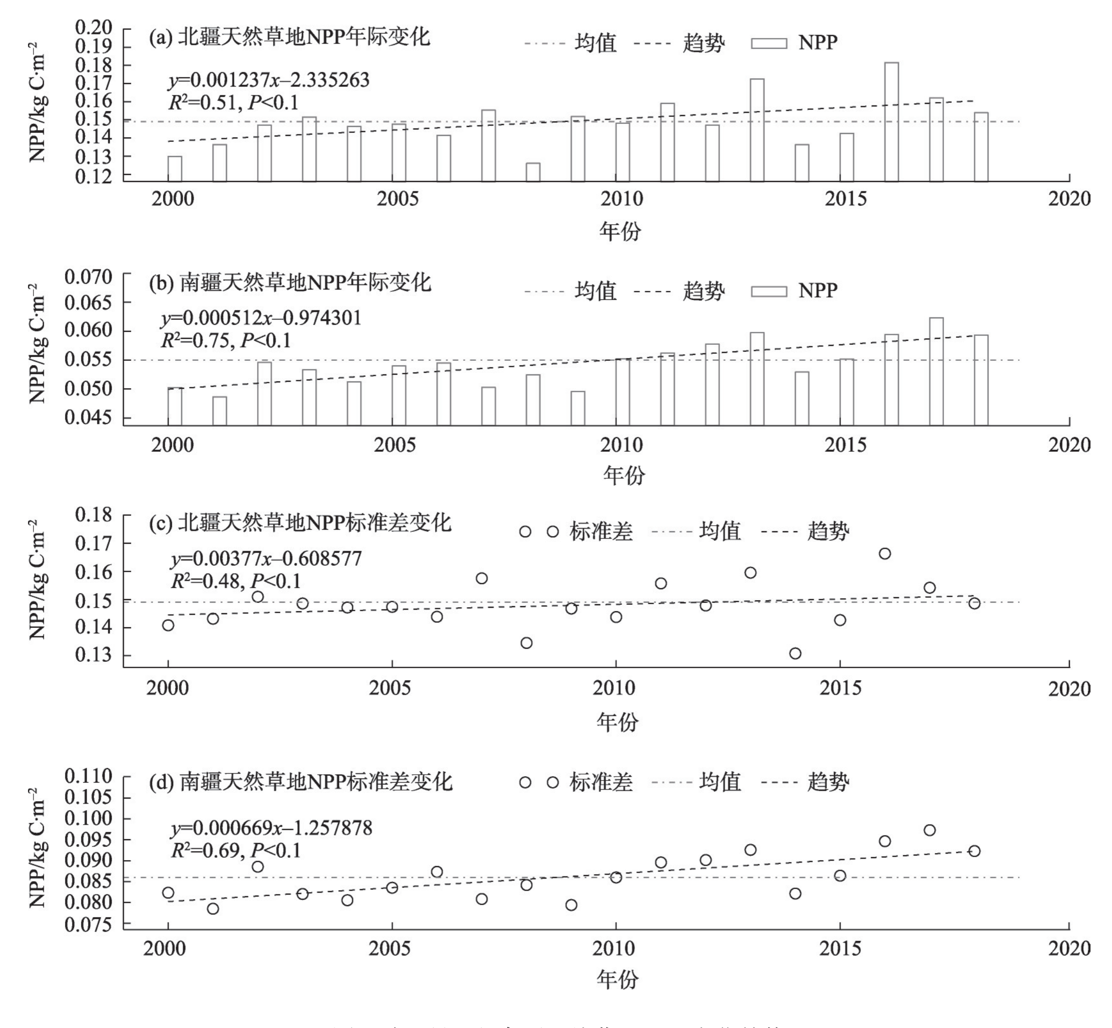


图6 新疆北疆、南疆天然草地NPP变化趋势

Fig. 6 Change trends of natural grassland NPP in northern and southern Xinjiang

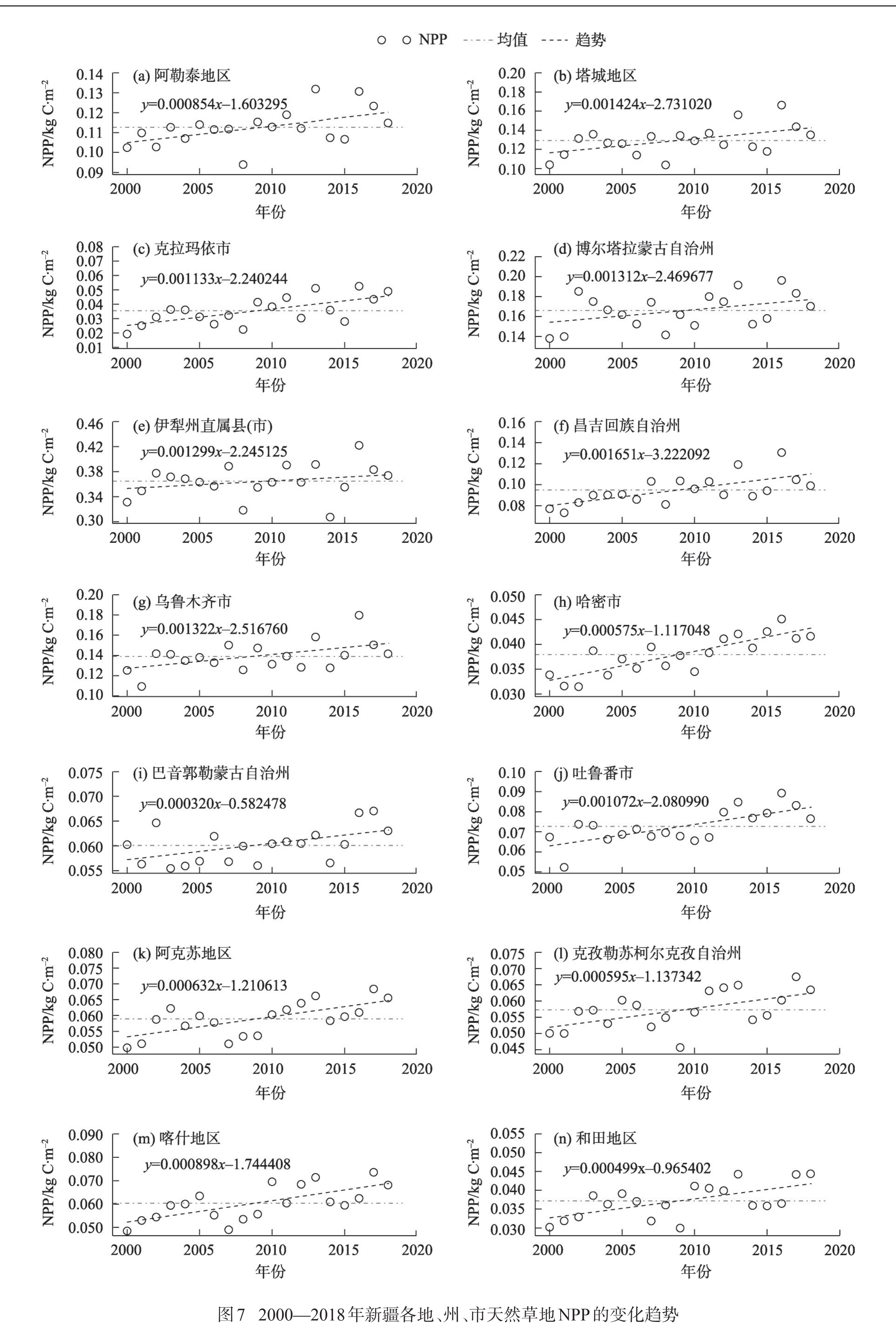


图7　2000—2018年新疆各地、州、市天然草地NPP的变化趋势

Fig. 7　Change trends of natural grassland NPP in each prefecture, Xinjiang from 2000 to 2018

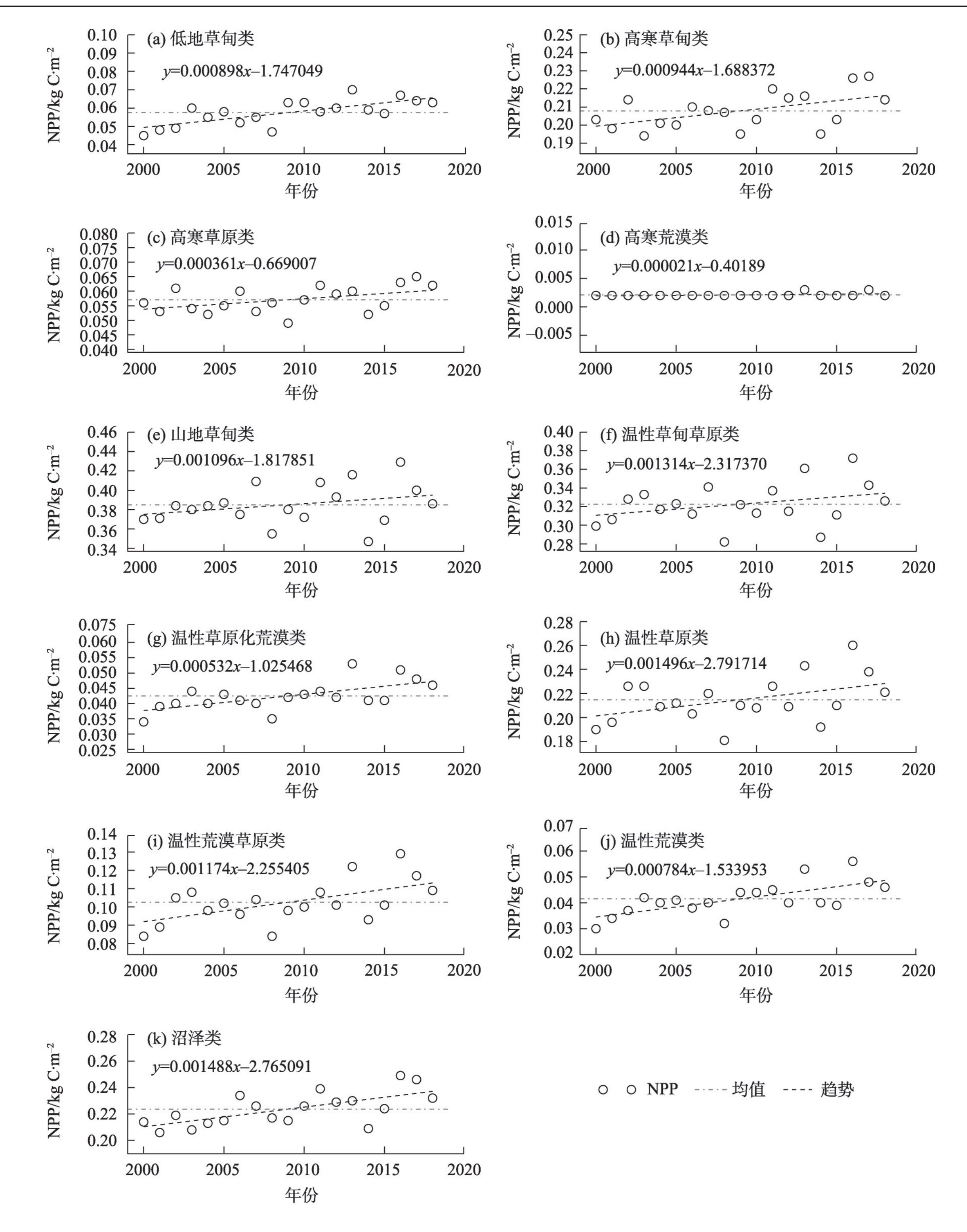
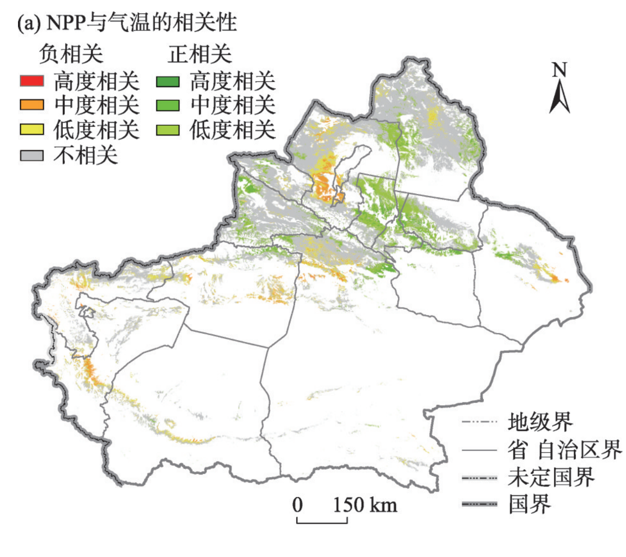


图8 新疆天然草地类型NPP变化趋势

Fig. 8 NPP trends of natural grassland types in Xinjiang

草原类(0.079 kg C·m^{-2})(图8h),明显高于其他草地类型。高寒荒漠类基本保持不变,仅在2014年与2018年出现轻微的脉动值(图8d)。草地NPP峰值发生在2016年,之后则表现为递减的趋势。在11种草地类型种,多年均NPP最大为山地草甸类(0.385 kg C·m^{-2})(图8e),其次为温性草甸草原类(0.322 kg C·m^{-2})(图8f)与沼泽类(0.223 kg C·m^{-2})(图8k);高寒荒漠类最低为0.002 kg C·m^{-2}(图8d),其次为温性荒漠类(0.041 kg C·m^{-2})(图8j)与温性草原化荒漠类(0.042 kg C·m^{-2})(图8g)。



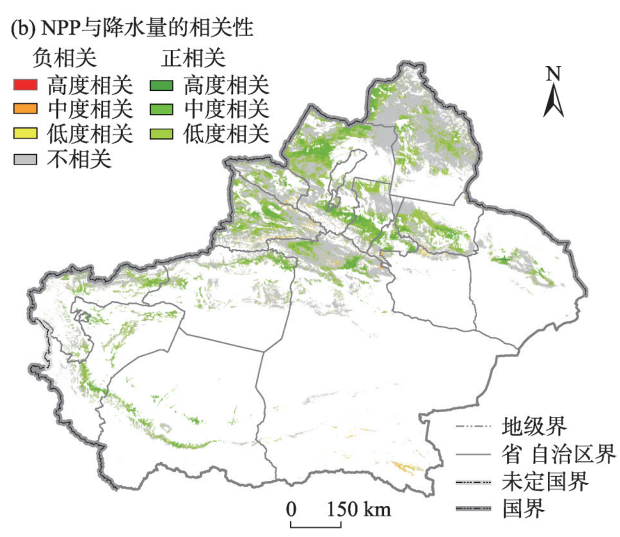


图9 2000—2018年新疆天然草地NPP与气温、降水量的相关性

Fig. 9 Correlations between natural grassland NPP and temperature, precipitation in Xinjiang from 2000 to 2018

2.4 新疆天然草地NPP对气温、降水量的响应

新疆天然草地NPP与气温、降水量相关性的空间分布(图9),在2000—2018年草地植被NPP对气温、降水量的响应具有空间差异。研究时段内,草地植被NPP与气温正、负相关性并存(图9a),草地NPP与气温相关系数均值为0.018,最高值为0.908,最低值为-0.906;据统计结果表明,正相关占20.41%(面积),其中高度正相关仅占0.02%,中度正相关占4.15%;正相关主要分布在天山北坡的昌吉州与乌鲁木齐市,南疆主要以负相关为主。草地植被NPP对降水量的响应整体为正相关性(图9b),正相关占41.74%,高度正相关与中度正相关分别占0.17%、12.62%,主要分布于伊犁河谷、天山北坡(昌吉州与乌鲁木齐市)与准噶尔西部山地,草地类型分别为低地草甸类、温性荒漠类与温性荒漠草原类;草地NPP与降水量的相关系数均值为0.234,最高值为0.957;南疆草地NPP与降水量的相关性主要表现中度相关。

3 讨 论

2000—2018年在气候变化与人类活动的双重影响下,新疆天然草地NPP具有时空分异特征。近20 a草地NPP总体为增加趋势,但NPP具有年际波动,尤其2007年后表现为增强趋势,这与降水的年际变化加剧相关[40];草地NPP多年平均值为0.103 kg C·m^{-2}(2000—2018年),最低值为0.090 kg C·m^{-2}(2008年),最高值0.122 kg C·m^{-2}(2016年),变化幅度为0.032 kg C·m^{-2}。草地NPP(多年均值)具有空间差异,由伊犁河谷、天山、阿尔泰山、昆仑山脉及其准噶尔西部山地向准噶尔盆地、塔里木盆地逐渐降低。草地NPP的空间特征与全疆降水的空间格局具有正相关性,这与张仁平等[23]基于MODIS NDVI等数据集采用CASA模型模拟的草地NPP格局一致。

新疆天然草地NPP时空演变格局与水热变化关系密切[41],远离海洋、高山环抱与封闭的盆地地形造就了新疆特殊的自然地理环境,直接影响了地表水热资源分布与变化[34]。研究时段内,新疆北疆、南疆天然草地NPP均表现为波动增加,尽管北疆草地NPP多年均值(0.149 kg C·m^{-2})与递增的趋势高于南疆(0.055 kg C·m^{-2}),但北疆的年际波动高于南疆,这是因为在生长季北疆的极端降水量年际间变化大[40]。姚俊强等[42]分析了1961—2018年新疆89个台站的气象数据,结果显示虽然全疆降水量呈现增加趋势,但是显著增加的区域仅分布在伊犁河谷、准噶尔西部山地、天山北坡与塔里木盆地南缘,北疆极端降水发生频率高于南疆。准噶尔西部山地、伊犁河谷与天山北坡受北大西洋暖湿气流的影响,加之地形因素,气温随山体升高而递减,在山地迎风坡降水量较多,主要在山地最大降水线以下随地势升高而递增("雨影效应")[43]。北疆的升温速率高于南疆,北疆最低气温升幅明显,气温上升带来草地生长季延长[32]。西伯利亚气团与蒙古高原气团水分含量少,加剧了南疆尤其是塔里木盆地

的干旱程度[44-45]，南疆最高气温增加显著，导致蒸散需求旺盛，当降水量的增加不足以抵消蒸散增加的需求量，区域陆面便趋于干旱逐渐反馈至大气导致暖干化[42,44-45]。草地植被NPP与气温正、负相关性并存，草地植被NPP对降水量的响应整体为正相关性。草地NPP与气温、降水量相关系数均值分别为0.018（P=0.6）、0.234（P=0.076）；统计显示，草地NPP与气温、降水量的正相关面积分别占20.41%、41.74%。草地NPP与气温正相关的区域，主要分布在天山北坡（昌吉州与乌鲁木齐市），南疆以负相关为主。草地NPP与降水量正相关的区域，主要分布于伊犁河谷、天山北坡（昌吉州与乌鲁木齐市）与准噶尔西部山地，草地类型分别为低地草甸类、温性荒漠类与温性荒漠草原类。

在全球变化背景下，2000年后新疆气候为"非对称暖湿化"（Asymmetric warming-wetting），即全区总体上表现为暖湿化趋势，但局域为暖干化[40,46-47]，气温、降水量增加促进草地生长，本研究结果显示2000—2018年新疆天然草地NPP为递增的趋势。新疆"暖湿化"具有高位、低位震荡[42]，引起草地NPP的年际波动。研究时段内，草地NPP与气温、降水量正、负相关性并存；草地NPP对降水量的响应呈现为正相关，负相关仅占总面积6%，以低度负相关为主。气候暖湿化在草地生长季最明显，尤其是夏季极端降水的增加[40,42]，降水仍然是新疆草地生长的重要因素[26]；研究结果显示，近20 a新疆天然草地NPP表现为增加趋势的占49.78%，主要分布在阿尔泰山、准噶尔西部山地、天山北坡与天山山脉。

2000年后，国家开展"退牧还草"工程，全面实行草原生态保护补助奖励机制，草地退化趋势减弱，草地生态状况具有改善趋势，扭转了以往草地持续恶化的状况[48-49]。这与本研究采用遥感观测的结果一致，2000年后新疆天然草地NPP总体为波动式增加。过度放牧是导致草地退化的重要因素[48,50]，自治区实行禁牧、休牧、划区轮牧与草地补播等措施，减轻了人类扰动对草地的影响[51-52]，在一定程度上遏制了草地退化，促进了草地资源利用的可持续性。多项研究表明：新疆"草原生态保护补助奖励机制"实施后，天然草地植被长势总体上有所提高，草地NPP和覆盖度增加，提高了草地质量和可采食的天然牧草量，促进了草地资源的可持续利用[53-55]。

4 结 论

本研究利用2000—2018年MODIS数据集（MOD17A3HGF）和相关辅助数据（新疆维吾尔自治区标准地图、新疆天然草地分类数据与气温、降水量数据集），以NPP作为草地生态状况的重要指标，从不同空间尺度（全疆、南北疆、各地州市与新疆天然草地类型）、年际变化及其草地NPP对气候因子（气温、降水量）的响应开展分析，结果表明：

（1）2000—2018年，新疆天然草地NPP表现为波动递增的趋势；草地多年均NPP由伊犁河谷、天山、阿尔泰山与昆仑山脉及其塔城地区向准噶尔盆地、塔里木盆地逐渐降低。

（2）北疆草地年均NPP高于南疆，北疆与南疆草地NPP均表现为增加趋势，北疆草地NPP递增的趋势高于南疆；各地州草地NPP总体为增加，但年际变化分异明显；11种天然草地类型为波动递增，但是高寒荒漠类几乎没有变化。

（3）草地植被NPP与气温正、负相关性并存；草地植被NPP对降水量的响应整体为正相关性。

参考文献（References）

[1] 张利, 周广胜, 汲玉河, 等. 中国草地碳储量时空动态模拟研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(10): 1392-1405. [Zhang Li, Zhou Guangsheng, Ji Yuhe, et al. Spatiotemporal dynamic simulation of grassland carbon storage in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2016, 46(10): 1392-1405.]

[2] 赵鹏, 陈桃, 王茜, 等. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系统NPP影响的定量分析[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 51-62. [Zhao Peng, Chen Tao, Wang Qian, et al. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on grassland ecosystem NPP in Xinjiang[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 51-62.]

[3] Costanza R, Michael M. What is a healthy ecosystem?[J]. Aquatic Ecology, 1999, 33(1): 105-115.

[4] Wu J G. Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 209-221.

[5] 邬建国, 郭晓川, 杨稢, 等. 什么是可持续性科学?[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 1-11. [Wu Jianguo, Guo Xiaochuan, Yang Yu, et al. What is sustainability science?[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 1-11.]

[6] 陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于MODIS的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(3): 402-410.

[Chen Zhuoqi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Analysis of net primary productivity of terrestrial vegetation on the Qinghai-Tibetan Plateau, based on MODIS remote sensing data[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(3): 402-410.]

[7] 李博, 赵斌, 彭容豪. 陆地生态系统生态学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. [Li Bo, Zhao Bin, Peng Ronghao. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.]

[8] 陈宸, 井长青, 邢文渊, 等. 近20年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应[J]. 草业学报, 2021, 30(3): 1-14. [Chen Chen, Jing Changqing, Xing Wenyuan, et al. Desert grassland dynamics in the last 20 years and its response to climate change in Xinjiang [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(3): 1-14.]

[9] 杨峰, 钱育蓉, 李建龙, 等. 天山北坡典型荒漠草地退化特征及其成因[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1306-1314. [Yang Feng, Qian Yurong, Li Jianlong, et al. Degradation characteristics and causes of desert grassland in the northern Tianshan Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(8): 1306-1314.]

[10] 徐文轩, 连仲民, 徐婷, 等. 新疆准噶尔盆地荒漠草地水源圈植物群落退化格局[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 104-110. [Xu Wenxuan, Lian Zhongmin, Xu Ting, et al. Degradation pattern of desert steppe plant community around a piosphere in Junggar Basin of Xinjiang[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 104-110.]

[11] 陈佼, 张丽. 天山北坡草地盖度高光谱遥感估算[J]. 草业科学, 2017, 34(1): 30-39. [Chen Jiao, Zhang Li. Estimating grassland coverage based on hyperspectral remote sensing in the northern Tianshan Mountains[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(1): 30-39.]

[12] 周李磊, 朱华忠, 钟华平, 等. 新疆伊犁地区草地土壤容重空间格局分析[J]. 草业学报, 2016, 25(1): 64-75. [Zhou Lilei, Zhu Huazhong, Zhong Huaping, et al. Spatial analysis of soil bulk density in Yili, Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 64-75.]

[13] 闫俊杰, 刘海军, 赵玉, 等. 2000—2015年新疆伊犁河谷草地NPP时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 390-396. [Yan Junjie, Liu Haijun, Zhao Yu, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland net primary productivity in Ili River Valley from 2000 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 390-396.]

[14] 任璇, 郑江华, 穆晨, 等. 新疆近15年草地NPP动态变化与气象因子的相关性研究[J]. 生态科学, 2017, 36(129): 43-51. [Ren Xuan, Zheng Jianghua, Mu Chen, et al. Correlation analysis of the spatial-temporal variation of grassland net primary productivity and climate factors in Xinjiang in the past 15 years[J]. Ecological Science, 2017, 36(129): 43-51.]

[15] 闫俊杰, 刘海军, 崔东, 等. 近15年新疆伊犁河谷草地退化时空变化特征[J]. 草业科学, 2018, 35(296): 508-520. [Yan Junjie, Liu Haijun, Cui Dong, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland degradation in Yili Valley of Xinjiang over the last 15 years[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(296): 508-520.]

[16] Duan H, Zhao H, Jiang Y, et al. Analysis of seasonal grassland change and its drivers during 1982—2006 in Xinjiang[J]. Rangeland Ecology & Management, 2017, 70(4): 422-429.

[17] Zhang W, Yang X, Manlike A, et al. Comparative study of remote sensing estimation methods for grassland fractional vegetation coverage: A grassland case study performed in Ili Prefecture, Xinjiang, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40 (5): 2243-2258.

[18] 蔡宗磊, 苗正红, 常雪, 等. 基于无人机大样方数据及国产卫星反演草地植被覆盖度方法研究[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1431-1440. [Cai Zonglei, Miao Zhenghong, Chang Xue, et al. Research on grassland fractional vegetation coverage inversion method based on drone large quadrat data and domestic satellite[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(5): 1431-1440.]

[19] 郭阳, 贾志斌, 张琪, 等. 基于遥感数据的内蒙古呼伦贝尔草原草畜平衡时空动态研究[J]. 中国草地学报, 2021, 43(4): 30-37. [Guo Yang, Jia Zhibin, Zhang Qi, et al. Study on the spatiotemporal dynamics of forage-livestock balance in Hulunbuir grassland of Inner Mongolia based on remote sensing data[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(4): 30-37.]

[20] Shi Y, Gao J, Li X, et al. Improved estimation of aboveground biomass of disturbed grassland through including bare ground and grazing intensity[J]. Remote Sensing, 2021, 13, 2105, doi: 10.3390/rs13112105.

[21] 孙世泽, 汪传建, 尹小君, 等. 无人机多光谱影像的天然草地生物量估算[J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 848-856. [Sun Shize, Wang Chuanjian, Yin Xiaojun, et al. Estimating aboveground biomass of natural grassland based on multispectral images of unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(5): 848-856.]

[22] 荀其蕾, 董乙强, 安沙舟, 等. 基于MOD 09GA数据的新疆草地生长状况遥感监测研究[J]. 草业学报, 2018, 27(4): 10-26. [Xun Qilei, Dong Yiqiang, An Shazhou, et al. Monitoring of grassland herbage accumulation by remote sensing using MOD 09GA data in Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(4): 10-26.]

[23] 张仁平, 郭靖, 张云玲. 新疆草地净初级生产力(NPP)空间分布格局及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5318-5326. [Zhang Renping, Guo Jing, Zang Yunling. Spatial distribution pattern of NPP of Xinjiang grassland and its response to climatic changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5318-5326.]

[24] 杜梦洁, 郑江华, 任璇, 等. 地形对新疆昌吉州草地净初级生产力分布格局的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4789-4799. [Du Mengjie, Zheng Jianghua, Ren Xuan, et al. Effects of topography on the distribution pattern of net primary productivity of grassland in Changji Prefecture, Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (13): 4789-4799.]

[25] 任璇, 郑江华, 穆晨, 等. 不同气象插值方法在新疆草地NPP估算中的可靠性评价[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 439-448. [Ren Xuan, Zheng Jianghua, Mu Chen, et al. Evaluating reliability of grassland net primary productivity estimates using different meteorological interpolation methods[J]. Pratacultural Science, 2017, 34 (3): 439-448.]

[26] Jiang Y, Guo J, Peng Q, et al. The effects of climate factors and human activities on net primary productivity in Xinjiang[J]. International Journal of Biometeorology, 2020, 64(1): 765-777.

[27] 郭燕云, 刘艳, 李秋月, 等. CENTURY模型在新疆天山山区的适用性分析[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 252-258. [Guo Yanyun, Liu Yan, Li Qiuyue, et al. Validation and adaptability evaluation of grassland ecosystem model CENTURY in the Tianshan Mountain area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(1): 252-258.]

[28] 黄小涛, 罗格平. 新疆草地蒸散与水分利用效率的时空特征[J]. 植物生态学报, 2017, 41(5): 506-518. [Huang Xiaotao, Luo Geping. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and water use efficiency in grasslands of Xinjiang[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(5): 506-518.]

[29] 韩其飞, 罗格平, 李超凡, 等. 放牧对新疆草地生态系统碳源/汇的影响模拟研究[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4392-4399. [Han Qifei, Luo Geping, Li Chaofan, et al. Modeling the grazing effect of grassland on the carbon source/sink in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4392-4399.]

[30] 杨静雅, 李新国, 闫凯, 等. 基于NDVI的新疆和静县草地植被覆盖动态变化及其与气温降水的关系[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 38-44. [Yang Jingya, Li Xinguo, Yan Kai, et al. Grassland vegetation dynamics and the relationship between the temperature and precipitation in Hejing County, Xinjiang, based on NDVI[J]. Ecological Science, 2018, 37(6): 38-44.]

[31] Zhang R, Liang T, Guo J, et al. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-11.

[32] Zhang R, Guo J, Yin G. Response of net primary productivity to grassland phenological changes in Xinjiang, China[J]. Peerj, 2021, 9(1): e10650, doi: 10.7717/peerj.10650.

[33] 刘嘉麒, 李泽椿, 秦小光. 新疆地区自然环境演变、气候变化及人类活动影响[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. [Liu Jialqi, Li Zechun, Qin Xiaoguang. The evolution of the natural environment, climate change and the impact of human activities in Xinjiang[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2014.]

[34] 杨利普. 新疆水资源及其利用[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1981. [Yang Lipu. Xinjiang water resources and utilization[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1981.]

[35] 许鹏. 新疆草地资源及其利用[M]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区畜牧厅/新疆科技卫生出版社, 1993. [Xu Peng. Xinjiang grassland resources and its utilization[M]. Urumqi: Animal Husbandry Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region/Xinjiang Science and Technology Publishing House, 1993.]

[36] 罗麟. 新疆草地资源介绍(一)[J]. 新疆畜牧业, 1990(5): 32-36. [Luo Lin. Introduction to Xinjiang grassland resources(I)[J]. Xinjiang Xumuye, 1990(5): 32-36.]

[37] Running S, Zhao M. Mod17a3hgf Modis/terra net primary production gap-filled yearly L4 global 500m sin grid v006[J]. Nasa Eosdis Land Processes Daac. Available Online: Https://doi.Org/10.5067/modis/mod17a3hgf, 2019, 6.

[38] Yang K, He J, Tang W J, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38-46.

[39] He J, Yang K, Tang W, et al. The first high-resolution meteorological forcing sataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-11.

[40] Wang Q, Zhai P, Qin D. New perspectives on 'warming-wetting' trend in Xinjiang, China[J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3): 252-260.

[41] 杨淑霞, 张文娟, 冯琦胜, 等. 基于MODIS逐日地表反射率数据的青南地区草地生长状况遥感监测研究[J]. 草业学报, 2016, 25(8): 14-26. [Yang Shuxia, Zhang Wenjuan, Feng Qisheng, et al. Monitoring of grassland herbage accumulation by remote sensing using MODIS daily surface reflectance data in the Qingnan Region[J]. Acta Prataculturae Sinica. 2016, 25(8): 14-26.]

[42] 姚俊强, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 新疆气候水文变化趋势及面临问题思考[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 1-14. [Yao Junqiang, Chen Jing, Tuoliwubieke Dilinuer, et al. Trend of climate and hydrology change in Xinjiang and its problems thinking[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 1-14.]

[43] Sun H, Liu X. Impacts of the uplift of four mountain ranges on the arid climate and dust cycle of inland Asia[J]. Palaeogeography, 2018, 505: 167-179.

[44] Zhang R, Liu P, Zhang K. Spatio-temporal characteristics of potential climate productivity of grassland and its responses to climate change in Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(1): 181-187.

[45] An L, Hao Y, Yeh T J, et al. Annual to multidecadal climate modes linking precipitation of the northern and southern slopes of the Tianshan Mts[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 140(1): 453-465.

[46] Li C, Wang R, Ning H, et al. Characteristics of meteorological drought pattern and risk analysis for maize production in Xinjiang, northwest China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 133(3): 1269-1278.

[47] Yao J, Chen Y, Zhao Y, et al. Response of vegetation NDVI to climatic extremes in the arid region of Central Asia: A case study in Xinjiang, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 131(3): 1503-1515.

[48] 张海燕, 樊江文, 邵全琴, 等. 2000—2010年中国退牧还草工程区生态系统宏观结构和质量及其动态变化[J]. 草业学报, 2016, 25(4): 1-15. [Zhang Haiyan, Fan Jiangwen, Shao Quanqin, et al. Ecosystem dynamics in the 'Returning Rangeland to Grassland' programs, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(4): 1-15.]

[49] 张海燕, 樊江文, 邵全琴. 2000—2010年中国退牧还草工程区土地利用/覆被变化[J]. 地理科学进展, 2015, 34(7): 840-853. [Zhang Haiyan, Fan Jiangwen, Shao Quanqin. Land use/land cover

change in the grassland restoration program areas in China, 2000—2010[J]. Progress in Geography, 2015, 34(7): 840−853.]

[50] 胡振通, 孔德帅, 魏同洋, 等. 草原生态补偿: 减畜和补偿的对等关系[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1846−1859. [Hu Zhentong, Kong Deshuai, Wei Tongyang, et al. Grassland eco-compensation equivalent relationship between livestock reduction and compensation[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(11): 1846−1859.]

[51] Liu Y, Wang Q, Zhang Z, et al. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013[J]. Science of the Total Environment, 2019, 690: 27−39.

[52] Naeem S, Zhang Y, Tian J, et al. Quantifying the impacts of snthropogenic sctivities and climate variations on vegetation productivity changes in China from 1985 to 2015[J]. Remote Sensing, 2020, 12 (7): 1113, doi:10.3390/rs12071113.

[53] 李伟. 新疆实施草原生态保护补助奖励机制初期成效研究[J]. 新疆畜牧业, 2015, 220(10): 22−27. [Li Wei. Study on the initial effectiveness of Xinjiang's implementation of grassland ecological protection subsidy and reward mechanism[J]. Xinjiang Xumuye, 2015, 220(10): 22−27.]

[54] 姜萍, 丁文广, 肖静, 等. 新疆植被NPP及其对气候变化响应的海拔分异[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 849−857. [Jiang Ping, Ding Wenguang, Xiao Jing, et al. Altitudinal difference of vegetation NPP and its response to climate change in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 849−857.]

[55] 谢大伟, 张诺, 苏颖, 等. 深度贫困地区易地扶贫搬迁产业发展模式及制约因素分析——以新疆南疆三地州为例[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1401−1408. [Xie Dawei, Zhang Nuo, Su Ying, et al. Industial development modes and restraining factors of severe poverty region after resident relocation for poverty alleviation: Cases of three prefectures in south Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1401−1408.]

Spatiotemporal analysis of net primary productivity for natural grassland in Xinjiang in the past 20 years

CHEN Chunbo[1,2], LI Gangyong[2], PENG Jian[2]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Joint Laboratory for Remote Sensing Monitoring of Grassland Ecosystem in Arid Area, Xinjiang Grassland Technical Promotion Station, Urumqi 830049, Xinjiang, China)

Abstract: This study investigates the spatiotemporal dynamics of natural grassland NPP and its response to climatic change in Xinjiang Uygur Autonomous Region, China from 2000 to 2018, based on MOD17A3HGF NPP data and related auxiliary datasets (e.g., temperature and precipitation). The different spatial scales (in whole Xinjiang, northern and southern Xinjiang, various prefectures, and different natural grassland types, respectively), inter-annual changes, trend analysis, and partial correlation analysis were adopted to characterize grassland NPP variation. The results illustrate that grassland NPP showed an increased volatility trend from 2000 to 2018, and the mean average of NPP is 0.103 kg C·m^{-2}. In terms of spatial pattern, it decreases gradually from the western mountains of Junggar, Ili River Valley, Tianshan Mountains, and Altay Mountains to the Junggar and Tarim Basin. Although the grassland NPP of northern Xinjiang (0.149 kg C·m^{-2}) is higher than that of southern Xinjiang (0.055 kg C·m^{-2}), its inter-annual fluctuations are greater than that of southern Xinjiang. Grassland NPP in the entire state shows an increasing trend, but the inter-annual changes are distinct. The NPP of 11 natural grassland types (except for alpine deserts) is increasing; however, there are big differences in variable grassland types. Therefore, it is beneficial to the growth of grassland vegetation after 2000 that the warming-wetting trend and mitigation of human interference in Xinjiang. However, anomalies of inter-annual precipitation result in the inter-annual fluctuations of grassland NPP.

Key words: asymmetric warming-wetting; net primary productivity; spatiotemporal dynamics; space earth observation; natural grassland in Xinjiang